

# PROBLEMAS MECANICA 2-FISICAS

## RELATIVIDAD ESPECIAL

### Problema 1

Un haz de electrones es acelerado por un van de Graaff. Una vez acelerado, se mide el tiempo de vuelo necesario para recorrer la distancia de 8.4 m de separación entre dos electrodos. Los datos experimentales están resumidos en la tabla adjunta. Representar gráficamente el cuadrado de la velocidad frente a la energía cinética mostrando la desviación respecto a lo esperado en mecánica newtoniana.

E kin (MeV)	t( $\times 10^{-8}$ s)	v ( $\times 10^8$ m/s)
0.5	3.23	2.6
1.0	3.08	2.73
1.5	2.92	2.82
4.5	2.84	2.96
15.0	2.80	3.00

### Problema 2

La tabla adjunta resume una serie de medidas para la velocidad de haces de fotones en un rango muy amplio de energías, cubriendo desde fotones emitidos en un tubo de televisión hasta fotones producidos en rayos cósmicos. Representar gráficamente la velocidad frente a una cualquiera de las otras variables (Am. J. Phys. 25 (1957) 180).

$\nu$ (Hz)	E (eV)	$\lambda$ (m)	v ( $\times 10^8$ m/s)
$4.7 \cdot 10^7$	$1.9 \cdot 10^{-7}$	6.4	$2.9978 \pm 0.0003$
$1.7 \cdot 10^8$	$7.0 \cdot 10^{-7}$	1.8	$2.99795 \pm 0.00003$
$3.0 \cdot 10^8$	$1.2 \cdot 10^{-6}$	1.0	$2.99792 \pm 0.00002$
$3.0 \cdot 10^9$	$1.2 \cdot 10^{-5}$	0.1	$2.99792 \pm 0.00009$
$3.4 \cdot 10^{10}$	$1.0 \cdot 10^{-4}$	$1.2 \cdot 10^{-2}$	$2.997928 \pm 0.000003$
$7.2 \cdot 10^{10}$	$3.0 \cdot 10^{-4}$	$4.2 \cdot 10^{-3}$	$2.997925 \pm 0.000001$
$5.4 \cdot 10^{14}$	2.2	$5.6 \cdot 10^{-7}$	$2.997931 \pm 0.000003$
$1.2 \cdot 10^{20}$	$5.9 \cdot 10^5$	$7.3 \cdot 10^{-12}$	$2.983 \pm 0.015$
$4.1 \cdot 10^{22}$	$1.7 \cdot 10^8$	$7.2 \cdot 10^{-15}$	$2.97 \pm 0.03$

### Problema 3

Un paquete de  $10^{14}$  electrones acelerados a 15 MeV incide sobre un bloque de cobre de 100 g. El calor específico del cobre es  $0.386 \text{ Jul/gK}$ . Determinar el aumento de temperatura del bloque de cobre.

### Problema 4

Se suministra a una partícula una energía cinética igual a  $n$  veces su energía en reposo. Determinar a) su velocidad y b) su cantidad de movimiento.

### **Problema 5**

Hallar el voltaje a través del cual deberá acelerarse un electrón para que su masa aumente un 0.4%. Calcular su velocidad.

### **Problema 6**

Estudiar el movimiento de una masa puntual bajo una fuerza constante. Considerar dos casos limites, el newtoniano y el relativista.

### **Problema 7**

Demostrar que en el limite no relativista las siguientes expresiones son válidas:

- $E = m_0 c^2 [1 + \frac{\beta^2}{2}]$
- $E_{kin} = \frac{1}{2} m_0 \cdot c^2 \cdot \beta^2$
- $pc = m_0 \cdot c^2 \cdot \beta$
- $\gamma = 1 + \frac{1}{2} \cdot \beta^2$

### **Problema 8**

Calcular la desviación que sufre un fotón que roza la superficie del Sol. Suponemos que su trayectoria es una línea recta recorrida con velocidad constante  $c$  y que la componente normal a la trayectoria, debida a la fuerza gravitatoria, imparte al fotón un impulso transverso dado por  $\Delta p = \int F \cdot \cos\theta \cdot dt$ . La desviación pedida será  $\alpha = \frac{\Delta p}{p}$ .

### **Problema 9**

El LHC del CERN colisionará protones de energías igual a  $7 TeV$ . Determinar:

- la masa de los protones del haz en unidades de la masa en reposo
- su velocidad
- la energía disipada por un paquete de  $10^{13}$  protones

Tomar para la masa en reposo del protón el valor de  $1 GeV$ . Repetir el ejercicio para electrones. Tómese para la masa en reposo del electrón el valor de  $0.5 MeV$ .

### **Problema 10**

Probar que la ecuación de propagación de una onda electromagnética no es invariante frente a una transformación de Galileo.

### **Problema 11**

Demostrar que si lo es frente a una transformación de Lorentz.

### **Problema 12**

Goldfinger pretende aniquilar a su enemigo mortal 007, haciendo caer sobre él una lluvia tóxica mientras toma el sol en la playa junto a una de sus siempre atractivas acompañantes. Si la lluvia cae verticalmente con una velocidad de  $10m/s$ , con qué ángulo, respecto a la vertical, deberá inclinar Mr. Bond su parasol, a fin de que él y su chica permanezcan secos mientras escapan corriendo a  $15km/h$  en dirección a la moto acuática que tienen en la playa.

### **Problema 13**

Un suceso ocurre en  $x' = 60m$  a  $t' = 8 \cdot 10^{-8} s$  en un sistema  $S'$ . Sabemos que  $S'$  se mueve con velocidad  $\frac{3c}{5}$  respecto a un sistema inercial  $S$  cuyos orígenes coinciden en  $t = t' = 0$ . Determinar las coordenadas de este suceso en  $S$ .

### **Problema 14**

Las coordenadas de dos sucesos observados en  $S$  son

- $x_1 = x_0, t_1 = \frac{x_0}{c}, y_1 = z_1 = 0$
- $x_2 = 2 \cdot x_0, t_2 = \frac{x_0}{2 \cdot c}, y_2, z_2 = 0.$

Existe un sistema en el que ambos sucesos sean simultáneos? Si así es, determinar la velocidad de este sistema respecto a  $S$  y el tiempo, medido en  $S'$ , en que ambos sucesos ocurren.

### **Problema 15**

Una partícula se mueve en  $S'$  con velocidad constante igual a  $\beta = \frac{1}{2}$  y formando un ángulo de sesenta grados con el eje  $OX'$ . La velocidad de  $S'$  con respecto a  $S$  es  $0.6c$  a lo largo de  $OX-OX'$ . Determinar la ecuación de la trayectoria para un observador ligado a  $S$ .

### **Problema 16**

Un observador nota que dos sucesos están separados en espacio y tiempo  $600 m$  y  $8 \cdot 10^{-7} s$ . Con qué velocidad relativa a  $O$  se mueve  $O'$  para quien los dos sucesos aparecen como simultáneos.

### **Problema 17**

Dos sistemas inerciales se mueven uno respecto al otro con velocidad relativa  $\frac{c}{2}$ . Dibujar el correspondiente diagrama de Minkowski. Representar gráficamente las hipérbolas de calibración que permiten definir distancias en los ejes  $OX, OX'$ . Representar los sucesos:

- $x_1 = c \cdot t_1 = 1$
- $x'_2 = c \cdot t'_2 = 1$
- $x'_3 = 2, c \cdot t'_3 = 0$
- $x_4 = 0, c \cdot t_4 = 2$

### **Problema 18**

Las ecuaciones que describen un giro en el plano (x,y) son

$$x' = x \cdot \cos\theta + y \cdot \sin\theta \quad (1)$$

$$y' = -x \cdot \sin\theta + y \cdot \cos\theta \quad (2)$$

Demostrar que las transformaciones de Lorentz pueden también escribirse como una rotación en el plano (x,ict) de ángulo

$$\theta = \arctan(i\beta) \quad (3)$$

### **Problema 19**

La ecuación de un pulso esférico de luz que comienza en el origen de un sistema de coordenadas S es  $x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2 = 0$ . Demostrar que un observador ligado a un sistema S' que se mueve con respecto a S con velocidad v a lo largo de OX-OX' también ve un pulso esférico.

### **Problema 20**

Una barra de longitud propia  $L_0$  se encuentra en reposo en un sistema  $S'$ . Yace en el plano  $X'Y'$  formando un ángulo  $\arcsin\frac{3}{5}$  con  $OX'$ .  $S'$  se mueve respecto a  $S$  con velocidad  $v$  a lo largo de  $OX$ . Determinar  $v$  si para un observador en  $S$  la barra forma con  $OX$  un ángulo de 45 grados. Calcular la longitud de la barra medida en  $S$ .

### **Problema 21**

Dos sucesos tienen lugar en un mismo punto espacial en un sistema de referencia  $S$ , pero separados temporalmente 4 s. Cuál es la separación espacial de estos sucesos en un sistema de referencia en el que temporalmente lo están 6 s.

### **Problema 22**

Dos sucesos ocurren en el mismo instante en un sistema  $S$  aunque separados espacialmente 1 km. Cual es la diferencia de tiempos en  $S'$  que se mueve respecto a  $S$  con velocidad constante a lo largo del eje común de abscisas, sabiendo que en  $S'$  están espacialmente separados 2 km.

### **Problema 23**

Nuestra galaxia tiene un diámetro de  $10^5$  años luz y las partículas más energéticas tienen una energía de  $10^{19}$  eV. Cuanto tardará un protón de esta energía en atravesar la galaxia, si el tiempo se mide en el sistema en reposo de a) la galaxia, b) el protón.

### **Problema 24**

Una nave espacial de longitud propia  $L_0$  navega con velocidad constante v relativa a un sistema inercial  $S$ . El morro de la nave  $A'$  pasa por el punto  $A$  de  $S$  en  $t = t' = 0$ . En ese instante emite una señal luminosa en dirección a la cola  $B'$ .

- cuanto tardará la señal en alcanzar  $B'$  medido en  $S'$
- en que instante medido en S alcanzará la señal la cola  $B'$
- en que instante medido en  $S$  pasa la cola de la nave por  $A$

### **Problema 25**

Un electrón, cuya masa en reposo es  $0.51 \text{ MeV}$  es acelerado a través de una diferencia de potencial de  $0.13 \text{ MV}$ . Una vez acelerado, se mueve con velocidad uniforme. Determinar el tiempo que tardará el electrón en recorrer una distancia de  $8.4 \text{ m}$ . Calcular la distancia que habría recorrido en su sistema propio.

### **Problema 26**

La vida media del leptón  $\mu$  es de aproximadamente  $2 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ . Si se crea un muón en un punto de la atmósfera a  $6000 \text{ m}$  de altitud con una velocidad  $\beta = 0.998$ , determinar la distancia media que recorrerá antes de desintegrarse para un observador terrestre.

### **Problema 27**

Un haz de muones monocromáticos incide verticalmente sobre la atmósfera. Determinar la relación entre la intensidad del haz al nivel del mar y a una altura  $h$  sobre este.

### **Problema 28**

La velocidad de la luz en agua es  $\frac{c}{n}$  siendo  $n = \frac{4}{3}$  el índice de refracción del agua. En 1851, Fizeau, encontró que la velocidad de la luz en un tanque de agua que se mueve con velocidad  $V$  se podía expresar como  $u = \frac{c}{n} + KV$  siendo  $K \sim 0.44$ . Calcular  $K$  según Lorentz.

### **Problema 29**

Los piones neutros se desintegran en dos fotones. Determinar la distribución angular en el laboratorio de los fotones que provienen de la desintegración de un haz de piones neutros de velocidad  $\beta$ .

### **Problema 30**

Un mesón pi cargado de masa en reposo  $140 \text{ MeV}$  se crea a  $100 \text{ km}$  sobre el nivel del mar, con una energía de  $1.5 \cdot 10^5 \text{ MeV}$ . Si se desintegra  $2 \cdot 10^{-8} \text{ s}$  después de su creación, determinado por un observador ligado a él, a qué altitud ocurre la desintegración?

### **Problema 31**

Los piones se desintegran en su propio sistema en reposo siguiendo una ley

$$N(t) = N(t = 0) \cdot 2^{-\frac{t}{\tau_0}} \quad (4)$$

siendo  $\tau_0 = 2 \cdot 10^{-8} \text{ s}$ . Se produce un haz de piones en un acelerador y se encuentra que dos tercios de ellos sobreviven una distancia de  $30 \text{ m}$ . Determinar la energía de este haz en unidades de su masa en reposo.

### **Problema 32**

Un haz de kaones con velocidad  $\frac{c\sqrt{3}}{2}$  atraviesa dos contadores de centelleo separados entre sí una distancia de  $9 \text{ m}$ . Mientras el primer contador marca 1000 cuentas, el segundo sólo 250. Determinar la vida propia de los mesones  $K$ .

### Problema 33

Un astronauta a 500 km de la tierra presiente que su vida durará no más de 2 ms por haberse irradiado inadvertidamente. Qué velocidad ha de impartir a la nave a fin de alcanzar la tierra a tiempo de ser intervenido.

### Problema 34

Dos pares de sucesos vienen dados por las coordenadas espacio-temporales de la tabla adjunta. Puede existir una conexión causal entre ellos? Existe un sistema en el que sean simultáneos?

Par	$x_1$	$y_1$	$z_1$	$t_1$	$x_2$	$y_2$	$z_2$	$t_2$
A	0.3 m	0.5 m	0.0	$2 \cdot 10^{-9} s$	0.4 m	0.7 m	0.0	$3 \cdot 10^{-9} s$
B	0.7 m	0.5 m	0.0	$5 \cdot 10^{-9} s$	0.4 m	0.6 m	0.0	$4 \cdot 10^{-9} s$

### Problema 35

A las 12 del mediodía una nave espacial pasa frente a la tierra con velocidad  $0.8 c$ . Los observadores de la nave y la tierra están de acuerdo en que son las 12 del mediodía. A las 12 : 30 según un reloj en la nave, ésta pasa junto a una estación interplanetaria fija con relación a la tierra y con relojes sincronizados con la estación terrestre. Qué hora es en ésta estación? Determinar la distancia a la que se encuentra esta estación interplanetaria respecto a la tierra. A las 12 : 30 hora de la nave, se establece comunicación con la tierra. Cuándo, en horario terrestre, recibe ésta la señal?

### Problema 36

Un núcleo radiactivo se desintegra en dos fragmentos iguales, cada uno de los cuales tiene una velocidad  $0.6 c$  respecto a su centro de masa. Determinar la velocidad de cada fragmento para un observador estacionario respecto al cual, el núcleo original se desplaza con velocidad  $v = 0.5 c$ . Suponemos que los fragmentos se mueven en la dirección del núcleo.

### Problema 37

Dos partículas se acercan una a la otra con velocidades  $v_1 = 0.9 c$  y  $v_2 = -0.9 c$  dirigidas según el eje  $OX$ . Determinar la velocidad de la una respecto a la otra.

### Problema 38

Un mesón  $K^0$  en reposo se desintegra en el modo  $K^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ . Cada uno de los piones en el estado final tiene una velocidad de  $0.85 c$ . Determinar la velocidad máxima y mínima que tendrán los piones resultantes de la desintegración de un  $K^0$  que vuela con una velocidad igual a  $0.9 c$ .

### **Problema 39**

Un avión supersónico vuela con velocidad igual a  $1000 \text{ m/s}$  relativa a un observador  $O$  en la torre de control de un aeropuerto. Un segundo avión vuela con velocidad relativa al anterior igual a  $5000 \text{ m/s}$ . Determinar la velocidad de este segundo avión relativa a  $O$ .

### **Problema 40**

Dos neutrones  $A$  y  $B$  se acercan uno al otro a lo largo de una línea recta. Cada uno de ellos tiene una velocidad  $\beta c$  en el laboratorio. Probar que la energía total de  $B$  observado por el sistema en que  $A$  se encuentra en reposo es  $(1 + \beta^2)(1 - \beta^2)^{-1} M_0 \cdot c^2$ .

### **Problema 41**

Consideremos tres galaxias  $A, B, C$ . Un observador en  $A$  nota que  $B$  y  $C$  receden respecto a él en direcciones opuestas cada una de ellas con  $\beta = 0.7$ . Determinar la velocidad de  $A$  observada en  $B$ . Y la de  $C$  en  $B$ .

### **Problema 42**

Tres naves espaciales  $A, B, C$  coinciden en el instante  $t = 0$  en una misma posición. Las naves  $B$  y  $C$  se mueven en la misma dirección, aunque en sentidos opuestos con velocidad relativa entre ellas de  $0.8 c$ . Transcurridos  $5 \text{ s}$  para la nave en  $A$ , esta emite una señal para la cual  $B$  anota  $6 \text{ s}$ . Al cabo de ese tiempo calcular

- la distancia entre  $B$  y  $C$  vista desde  $A$
- la velocidad de  $B$  y  $C$  respecto de  $A$

### **Problema 43**

El sistema  $S'$  se mueve respecto a  $S$  con velocidad  $0.6 c$  a lo largo de  $OX = OX'$ . En  $t' = 10^{-7} \text{ s}$ , una partícula parte de  $x' = 10 \text{ m}$  con velocidad constante  $-\frac{c}{3}$ . En  $t' = 3 \cdot 10^{-7} \text{ s}$  se la frena súbitamente. Para un observador ligado a  $S$ , se pide:

- la velocidad de la partícula durante su recorrido
- la distancia recorrida

### **Problema 44**

El sistema  $S'$  ( $S''$ ) se mueve respecto a  $S$  (resp.  $S'$ ) con una velocidad constante  $v_1$  (resp.  $v_2$ ). Demostrar que la aplicación sucesiva de estas dos transformaciones de Lorentz, es otra transformación de Lorentz de velocidad

$$\beta = \frac{\beta_1 + \beta_2}{1 + \beta_1 \cdot \beta_2} \quad (5)$$

### **Problema 45**

De acuerdo con la ley de Hubble las galaxias distantes se alejan de nosotros con velocidad proporcional a la distancia

$$v(r) = \alpha \cdot r \quad (6)$$

siendo  $\alpha = 2 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$ . A qué distancia de nosotros se encuentra una galaxia que recede con velocidad  $c$ ?. Se la puede observar?

### **Problema 46**

La máxima longitud de onda en la serie de Balmer para el átomo de hidrógeno es  $\lambda_0 = 656 \text{ nm}$ . Para la luz emitida por una galaxia distante, esta longitud de onda se mide en la tierra como  $\lambda = 1458 \text{ nm}$ . Determinar la velocidad de recesión de la galaxia.

### **Problema 47**

Una galaxia en Hydra emite luz con corrimiento al rojo correspondiente a una velocidad de retroceso de la tierra de  $6 \cdot 10^4 \text{ km s}^{-1}$ . Por tanto y de acuerdo con Hubble se encuentra a una distancia de  $3 \cdot 10^9$  años luz. Si esta galaxia pasó frente a la tierra hace  $T$  años y desde entonces se movió con velocidad constante, determinar  $T$ .

### **Problema 48**

El quasar  $3C - 9$  cuando emitió luz que acaba de llegar a la tierra se alejaba de nosotros con velocidad  $0.8 c$ . Una de las líneas de su espectro tiene una longitud de onda de  $1200 \text{ \AA}$  medida en una fuente estacionaria. A qué longitud de onda debe aparecer en el espectro del quasar?

### **Problema 49**

Una línea correspondiente al calcio en el espectro de la estrella  $\alpha - Centauro$  posee una longitud de onda de  $3968, 20 \text{ \AA}$ . La misma línea en el espectro solar está a  $3968, 49 \text{ \AA}$ . Determinar la velocidad radial de la estrella respecto al sistema solar.

### **Problema 50**

Un astronauta se aleja de la tierra con una aceleración igual a  $g$ . Determinar el tiempo que transcurre hasta que el corrimiento al rojo haga invisible a sus ojos el resplandor rojo de los signos de neón en la tierra. Dato:  $\lambda_{rojo} = 6000 \text{ \AA}$

### **Problema 51**

Un astronauta experimenta una aceleración propia igual a  $g$ . Si parte del reposo desde la tierra, demostrar que la distancia que ha recorrido al cabo de un tiempo terrestre  $t$  viene dada por la expresión

$$x(t) = \frac{c^2}{g} \cdot \left[ \sqrt{1 + \frac{g^2 t^2}{c^2}} - 1 \right] \quad (7)$$

Calcular el tiempo que necesitaría en alcanzar una velocidad igual a la mitad de la velocidad de la luz.

### **Problema 52**

Sea un fotón de energía igual a  $200 \text{ MeV}$  que vuela según el eje  $OX$ . Sea otro fotón de energía  $100 \text{ MeV}$  que lo hace en el eje  $OY$ . Determinar:

- La energía total del sistema de dos fotones
- Su cantidad de movimiento
- Su masa invariante
- Su dirección y velocidad

### **Problema 53**

En un sistema de referencia  $S$ , una partícula tiene una energía total de  $5 \text{ GeV}$  y un impulso de  $3 \text{ GeV}/c$ . Determinar:

- La energía de esta partícula en un sistema en el que su impulso es de  $4 \text{ GeV}/c$
- Su masa en reposo
- La velocidad relativa entre ambos sistemas

### **Problema 54**

Una partícula con masa en reposo  $m_0$  y energía cinética  $2 m_0 \cdot c^2$  choca contra otra en reposo de masa  $2 \cdot m_0$ . Calcular la masa en reposo  $M_0$  de la partícula compuesta resultante.

### **Problema 55**

Un fotón de energía  $E$  choca con una partícula en reposo de masa  $m_0$  y es absorbido por ella. Determinar la velocidad de la partícula compuesta resultante.

### **Problema 56**

Una partícula de masa en reposo  $m_0$  y que se mueve con velocidad  $\frac{4}{5} \cdot c$ , choca contra otra igual que se encuentra en reposo. Determinar la masa en reposo y la velocidad de la partícula compuesta resultante.

### **Problema 57**

Una partícula en reposo de masa  $M_0$  se desintegra en tres iguales de masa  $m_0$ . Una de ellas se mueve según el eje  $OX$  negativo con velocidad  $\frac{4}{5} \cdot c$ , y una segunda lo hace según el eje  $OY$  negativo con velocidad  $\frac{3}{5} \cdot c$ . Determinar:

- la dirección y velocidad de la tercera de ellas
- la razón  $\frac{M_0}{m_0}$ .

### **Problema 58**

El mesón  $\pi^0$  se desintegra en dos fotones con una vida media de  $10^{-16} \text{ s}$ . Supongamos que los dos fotones producto de la desintegración tengan la misma energía. Determinar

- el ángulo de apertura de los fotones en función de la energía del  $\pi^0$  y
- probar que la energía transversa (respecto a la dirección de vuelo del  $\pi^0$ ) de uno de los fotones es  $\frac{m_{\pi^0}}{2}$

### **Problema 59**

Un fotón de energía  $h\nu$  choca elásticamente con un electrón en reposo. El fotón dispersado tiene una energía  $\frac{h\nu}{2}$  y su dirección forma un ángulo de  $60$  grados con la del fotón incidente. Determinar  $\nu$ .

### **Problema 60**

Un antiprotón ( $\bar{p}$ ) con una energía cinética de  $\frac{2}{3} GeV$  se aniquila con un protón en reposo dando dos fotones:

$$\bar{p} + p \rightarrow \gamma\gamma \quad (8)$$

que vuelan en la dirección del antiprotón incidente, cada uno de ellos en un sentido. Determinar:

- la energía de los fotones en el estado final
- sus direcciones de vuelo
- las energías de los fotones en el sistema de referencia en el que el antiprotón incidente se encuentra en reposo.

Las masas en reposo tanto del protón como del antiprotón pueden tomarse como iguales a  $1 GeV$ .

### **Problema 61**

Un positrón de energía cinética  $0.51 MeV$  es absorbido por un electrón en reposo dando lugar a la formación de un átomo de positronio. Este se desintegra en dos fotones. Determinar

- la velocidad del positronio
- la energía máxima de los fotones resultantes de la desintegración del positronio.

La masa en reposo tanto del electrón como del positrón es  $0.51 MeV$ .

### **Problema 62**

Un fotón es dispersado por un protón en reposo. El protón es dispersado un ángulo  $\phi = 30$  grados y con energía cinética de  $100 MeV$ . Determinar:

- La energía del fotón incidente
- La dirección y la energía del fotón dispersado

### **Problema 63**

Un meson  $K^0$ , cuya masa en reposo es  $494 MeV$  se desintegra en vuelo en dos piones cargados, cuya masa en reposo es de  $135 MeV$ ,  $K^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ . Uno de los piones en el estado final permanece en reposo. Determinar: i) la energía del segundo pión y ii) la energía del  $K^0$ .

### **Problema 64**

Un fotón colisiona con un electrón en reposo creando un par electrón positrón

$$\gamma + e^- \rightarrow e^- + e^+ + e^- \quad (9)$$

Determinar la energía mínima del fotón incidente para que este proceso ocurra.

### **Problema 65**

Supongamos que el *SPS* del CERN nos suministra un haz de protones de energía  $200 GeV$  que incide sobre un blanco de protones en reposo. Determinar la máxima masa en reposo de una hipotética partícula  $X$  que se pudiera producir en la reacción  $p + p \rightarrow p + p + X$ .